Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 2, 2024, p. 197-214

Simulation of Heat and Mass Transfer in a Refractance Window Dryer for Aloe vera gel

A. Shahraki[1], M. Khojastehpour[1*], M. R. Golzarian[2], E. Azarpazhooh[3]

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Centre for Artificial Intelligence and Machine Learning, Edith Cowan University, WA 6027, Australia
3- Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: mkhpour@um.ac.ir)

Received: 02 January 2023 Revised: 19 February 2023 Accepted: 22 February 2023 Available Online: 22 February 2023	**How to cite this article:** Shahraki, A., Khojastehpour, M., Golzarian, M. R., & Azarpazhooh, E. (2024). Simulation of Heat and Mass Transfer in a Refractance Window Dryer for Aloe vera gel. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(2), 197-214. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.80368.1141

Introduction

Drying is one of the oldest methods of food preservation. To increase the efficiency of heat and mass transfer while maintaining product quality, the study of the drying process is crucial scientifically and meticulously. It is possible to conduct experimental tests, trial and error, in the drying process. However, this approach consumes time and cost, with a significant amount of energy resources. By harnessing available software and leveraging technological advancement to develop a general model for drying food under varying initial conditions, the drying process can be significantly optimized.

Materials and Methods

This study was conducted with the aim of simulating heat and mass transfer during Refractance window drying for aloe vera gel. Comsol Multiphysics version 5.6 is a three-dimensional model used to solve heat and mass transfer equations. For this purpose, the differential equations of heat and mass transfer were solved simultaneously and interdependently. The above model considered various initial conditions: water temperature of 60, 70, 80, and 90℃, and aloe vera gel thickness of 5 and 10 mm. The initial humidity and temperature of the aloe vera is uniform. The initial temperature is 4℃ and the initial humidity of the fresh aloe vera sample is 110 $g_{water}/g_{dry\ matter}$. Heat is supplied only by hot water from the bottom surface of the product.

Results and Discussion

The drying time was needed to reduce the moisture content of aloe vera gel from 110 to 0.1 $g_{water}/g_{dry\ matter}$ during Refractance window drying. Aloe vera gel with a thickness of 5 mm dried in 120, 100, 70, and 50 minutes at water temperatures of 60, 70, 80, and 90℃, respectively. For a 10 mm thick layer of aloe vera gel, the drying time was 240, 190, 150, and 120 minutes, for water temperatures of 60 to 90℃, respectively. These results demonstrate the importance of both the water temperature and thickness on the drying time. Furthermore, the drying rate of aloe vera gel increased as the water temperature increased from 60 to 90℃, the drying rates were 0.915, 1.099, 1.57, and 2.198 g_{water}/min for 5 mm thickness and 0.457, 0.578, 0.732, and 0.915 g_{water}/min for 10 mm thick layer of aloe vera gel, respectively.

Conclusion

Based on the simulation results, the optimal model is with a water temperature of 90℃ and an aloe vera gel thickness of 5 mm. Overall, the modeling results are consistent with the results of experimental data.

Keywords: Aloe vera gel, Heat transfer, Mass transfer, Refractance window dryer, Simulation

https://doi.org/10.22067/jam.2023.80368.1141

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱٤، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۳، ص ۲۱٤-۱۹۷

شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در خشک‌کن رفرکتنس ویندو برای ژل آلوئه‌ورا

آتنا شهرکی[۱]، مهدی خجسته‌پور[۲*]، محمودرضا گلزاریان[۳]، الهام آذرپژوه[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳

چکیده

این مطالعه با هدف شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در طول خشک کردن رفرکتنس ویندو برای ژل آلوئه‌ورا انجام شده‌است. با کمک نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس (COMSOL Multiphysics) یک مدل سه‌بعدی برای حل معادلات انتقال حرارت و جرم ایجاد شد. بدین منظور معادلات دیفرانسیل انتقال حرارت و جرم به‌صورت همزمان و وابسته به هم حل شدند. مدل فوق با شرایط اولیه، دمای آب ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس و ضخامت ژل آلوئه‌ورا ۵ و ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد زمان خشک کردن مورد نیاز برای کاهش رطوبت ژل آلوئه‌ورا از ۱۱۰ به ۰/۱ گرم آب بر گرم ماده خشک در طول خشک کردن رفرکتنس ویندو در دمای آب ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس برای ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۵ میلی‌متر به‌ترتیب ۱۲۰، ۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ دقیقه و برای ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به‌ترتیب ۲۴۰، ۱۹۰، ۱۵۰ و ۱۲۰ دقیقه بود. هم‌چنین سرعت خشک شدن برای ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۵ میلی‌متر به‌ترتیب ۰/۹۱۵، ۱/۰۹۹، ۱/۵۷ و ۲/۱۹۸ گرم آب بر دقیقه و برای ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به‌ترتیب ۰/۴۵۷، ۰/۵۷۸، ۰/۷۳۲ و ۰/۹۱۵ گرم آب بر دقیقه بود. بنابراین نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مطابق داده‌های تجربی مقالات مشابه است و هرچه دمای آب بالاتر و ضخامت محصول کم‌تر باشد، محصول سریع‌تر خشک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، انتقال جرم، رفرکتنس ویندو، ژل آلوئه‌ورا، شبیه‌سازی

مقدمه

خشک کردن یک عملیات واحد است و یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حفظ و نگه‌داری مواد غذایی است. در حالت کلی خشک‌کردن مواد غذایی از نظر اقتصادی دارای اهمیت است. تولید محصولات خشک با کیفیت می‌تواند نقش مهمی در افزایش صادرات کشور داشته باشد. هم‌چنین باعث می‌شود حجم و وزن ماده غذایی کم شود و حمل و نقل، نگه‌داری و ذخیره‌سازی محصول خشک‌شده آسان‌تر و ارزان‌تر شود. تبدیل محصولات کشاورزی به پودر از طریق خشک‌کردن، موثرترین روش برای ایجاد محصولی است که نه تنها از نظر عملکردی مناسب است، بلکه می‌تواند برای مدت طولانی بدون خراب شدن نگه‌داری شود. هدف نهایی از فرآیند خشک‌کردن کاهش مقدار ضایعات و افزایش مدت ماندگاری محصول‌ها است (Franco *et al.*, 2019). عیب اصلی مربوط به فرآیندهای خشک‌کردن این است که فرآیندی با مصرف انرژی بالا است. امروزه صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری، مهم‌ترین مسئله در تولید محصولات و رقابت‌پذیری آن‌ها در بازار است (Dev & Raghavan, 2012).

خشک‌کردن به روش رفرکتنس ویندو[۵] یکی از روش‌های نوین است که در سال‌های اخیر، به دلیل مزیت‌های متعدد، توجه زیادی به خود جلب کرده است. خشک کردن به روش رفرکتنس ویندو یک روش غیرحرارتی جدید برای خشک‌کردن محصولات از جمله پوره‌های حساس به حرارت، مایعات و خلال‌های میوه‌ها و سبزیجات است (Nindo, Feng, Shen, Tang, & Kang, 2003). تاکنون

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- مدرس و پژوهشگر ارشد، مرکز هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی، دانشکده علوم، دانشگاه ادیث کوآن، استرالیای غربی، استرالیا
۴- دانشیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mkhpour@um.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jam.2023.80368.1141

5- Refractance Window (RW)

مطالعات زیادی به‌منظور بررسی آزمایشگاهی خشک‌کن رفرکتنس ویندو انجام شده‌است.

در تحقیقی به ارزیابی زمان خشک شدن کیوی با خشک‌کن رفرکتنس ویندو پرداخته‌اند. تأثیر ضخامت محصول (۰/۸، ۱/۶ و ۲/۴میلی‌متر) و دمای آب (۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس) بر مدت زمان خشک‌کردن بررسی شده است. زمان لازم برای رسیدن به رطوبت نهایی در روش رفرکتنس ویندو در مقایسه با خشک‌کردن آون (ضخامت برش ۲/۴ میلی‌متر و دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس) ۱۴۰ دقیقه کم‌تر بود (Jafari, Azizi, Mirzaei, & Dehnad, 2016). در تحقیقی دیگر به خشک‌کردن انبه در خشک‌کن رفرکتنس ویندو پرداخته‌اند. ضخامت پوره انبه (۲، ۳ و ۴ میلی‌متر) و درجه حرارت آب (۸۵، ۹۰ و ۹۵درجه سلسیوس) متغیرهای مستقل این تحقیق بود. نتایج نشان می‌داد که خشک کردن انبه با ضخامت دو میلی‌متر کوتاه‌ترین زمان خشک شدن را دارد. نمونه بهینه انبه خشک‌شده با سیستم رفرکتنس ویندو، در دمای ۹۵ درجه سلسیوس با ضخامت ۲/۴۹ میلی‌متر تعیین شد (Shende & Datta, 2020).

نتایج حاصل از خشک‌کردن دو گونه پوره‌ی سیب‌زمینی با استفاده از خشک‌کن رفرکتنس ویندو با دمای آب گرم ۷۰ تا ۹۰ درجه‌سلسیوس نشان داد که شرایط بهینه مدت زمان خشک‌کردن برای یک گونه سیب‌زمینی ۲۰/۵ دقیقه و برای گونه‌ی دیگر ۱۲/۱ دقیقه و دمای آب ۹۴ درجه سلسیوس بود (Duarte-Correa, Vargas-Carmona, Vásquez-Restrepo, Ruiz Rosas, & Perez Martinez, 2021). همچنین نتایج تحقیقی مشابه از خشک‌کن رفرکتنس ویندو برای پوره‌ی انبه با ضخامت ۶ میلی‌متر در دمای آب گرم ۷۵، ۸۰، ۸۵ و ۹۰ درجه‌سلسیوس و سرعت هوا ۰/۷ متر بر ثانیه نشان داد که دمای محصول در ابتدا افزایش سریعی داشت و در طول فرآیند خشک شدن ثابت ماند. همچنین زمان خشک کردن مورد نیاز برای کاهش رطوبت پوره‌ی انبه از ۵/۳۳ تا ۰/۲۵ گرم آب بر گرم ماده خشک در طول خشک کردن رفرکتنس ویندو بین ۵/۷ و ۸/۵ ساعت بود (Kumar, Madhumita, Srivastava, & Prabhakar, 2022).

محققین در پژوهشی، به مقایسه‌ی پارامترهای خشک‌کردن در خشک‌کن هوای گرم و خشک‌کن رفرکتنس ویندو در دماهای مختلف (۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس) بر روی برش‌های سیب پرداختند. نتایج نشان داد که مدت زمان خشک‌کردن محصول در خشک‌کن رفرکتنس ویندو ۲۵ تا ۳۷/۵ درصد کم‌تر از خشک‌کن هوای گرم در شرایط مشابه خشک‌کردن است. همچنین این مطالعه نشان داد که خشک‌کردن رفرکتنس ویندو می‌تواند به‌طور موثر برای خشک‌کردن لایه‌های نازک میوه‌های حساس به حرارت مانند سیب در زمان کوتاه‌تری با کیفیت محصول بهتر در مقایسه با خشک‌کردن هوای گرم استفاده شود (Rajoriya, Shewale, & Hebbar, 2019).

در این مطالعه به بررسی نحوه شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در خشک‌کن رفرکتنس ویندو برای ژل آلوئه‌ورا پرداخته‌شده‌است. آلوئه‌ورا[1] یک گیاه پرخاصیت و بومی آفریقا است، اگرچه در سراسر جهان در اکثر مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری به دلیل توانایی آن برای سازگاری با آب و هوای مختلف کشت می‌شود (Kumar, Singh, Gupta, Bishayee, & Pandey, 2019). معمولا ژل آلوئه‌ورا را به دلیل داشتن آب زیاد پس از برداشت، بیش‌تر از چند روز نمی‌توان نگه‌داری کرد (Añibarro-Ortega *et al.*, 2019). آلوئه‌ورا خشک‌شده محصولی است که کاربرد متنوعی در صنعت دارد. از دلایل اصلی خشک‌کردن آلوئه‌ورا، تولید محصولی با قابلیت ماندگاری بیش‌تر و استفاده راحت از پودر آلوئه‌ورا و کاهش هزینه‌های مربوط به بسته‌بندی و حمل‌ونقل پودر آلوئه‌ورا می‌باشد (Antury, Rojas, & Bermeo, 2021). پودر آلوئه‌ورا اغلب برای پوست و همچنین به‌عنوان مواد تشکیل‌دهنده در فرآیندهای غذایی مختلف مانند نوشیدنی‌ها، بستنی و غیره استفاده می‌شود (Ayala-Aponte, Cárdenas-Nieto, & Tirado, 2021).

شبیه‌سازی و مدل‌سازی[2]، ابزاری بسیار قدرتمند برای پیش‌بینی الگوهای جریان هوا و تغییرات درجه حرارت و اثر پارامترهای موثر مختلف در محیط‌های کنترل‌شده مانند خشک‌کن‌ها است. با این روش می‌توان گستره وسیعی از شرایط خشک‌کردن را در یک محیط مجازی شبیه‌سازی کرد. مدل‌سازی انتقال حرارت و جرم در شرایط مختلف خشک کردن یکی از روش‌های کم‌هزینه برای بهینه کردن خشک‌کن‌های صنعتی در جهت افزایش بازده انرژی و بهبود کیفیت محصول نهایی است و جامعه علمی امروز نیازمند نظریه‌های دقیق در مبحث خشک شدن محصولات کشاورزی هست طوری که بتوانند فرایند خشک شدن را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند (Zou, Opara, & McKibbin, 2006). به‌طور کلی، مدل‌سازی برای خشک‌کن‌ها به دو روش تجربی و حل عددی (تحلیلی) انجام شده‌است. یکی از روش‌های حل عددی که می‌توان از آن برای حل مسئله‌های مهندسی استفاده کرد، روش المان محدود[3] است که با پیشرفت فناوری و رایانه، نرم‌افزارهای تحلیل مهندسی که با روش المان محدود کار می‌کنند رو به پیشرفت هستند (Milczarek & Alleyne, 2017).

نرم‌افزار کامسول یکی از پیشرفته‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی است و توانایی تحلیل همزمان چندین پدیده فیزیکی را دارد. این نرم‌افزار برای حل معادلات المان محدود است و به کمک آن به‌راحتی می‌توان معادلات دیفرانسیل جزئی[4] مربوط به پدیده‌های مختلف را

۱- صبر زرد
2- Simulation and Modeling
3- Finite Element Method (FEM)
4- Partial Differential Equation (PDE)

به‌صورت همزمان تعریف و تحلیل کرد (Mahapatra & Tripathy, 2018). این نرم‌افزار در فرآیند خشک‌کردن قابلیت تحلیل همزمان انتقال حرارت و انتقال جرم را دارد. در این مطالعه، به بررسی شبیه‌سازی انتقال حرارت و انتقال جرم در خشک‌کن رفرکتنس‌ویندو در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس و به روش المان محدود برای ژل آلوئه‌ورا پرداخته شده‌است.

در تحقیقی مدل‌سازی بر پایه‌ی معادلات تجربی بر روی فیجوآ[1] با دو ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر در خشک‌کن رفرکتنس ویندو با دمای آب گرم ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه‌سلسیوس و خشک‌کن همرفتی با دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه‌سلسیوس انجام شد. در این تحقیق، دوازده مدل تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدت زمان خشک‌کردن محصول در خشک‌کن رفرکتنس ویندو بسیار کم‌تر است و هرچه ضخامت محصول کم‌تر باشد محصول سریع‌تر خشک می‌شود. همچنین مناسب‌ترین مدل تجربی برای هر دو خشک‌کن مدل لگاریتمی[2] و میدیلی[3] است (Sánchez, Lancheros, Carvajal, & Moreno, 2020).

محققی، یک مدل ریاضی دوبعدی برای انتقال حرارت و جرم به‌صورت همزمان در طول خشک‌کردن رفرکتنس ویندو برای شیر و ماست بدون چربی اجرا کرد و دریافت مدل‌های ریاضی امکان مطالعه فرآیندهای مختلف در صنعت را فراهم می‌کند و مشکلاتی مانند مصرف بیش از حد انرژی و فرسودگی تجهیزات را به حداقل می‌رساند؛ همچنین نتایج نشان داد خشک‌کن رفرکتنس ویندو نسبت به سایر روش‌های خشک‌کردن، زمان خشک‌کردن کوتاه‌تر و انرژی مصرفی کم‌تری دارد (Herrera Ardila, 2022).

در تحقیقی، یک مدل با بررسی انتقال حرارت بین فیلم مایلار و پوره‌ی کدوتنبل در خشک‌کن رفرکتنس ویندو شبیه‌سازی شد. در این تحقیق، دو لایه‌ی فیلم مایلار و محصول به‌صورت دوبعدی در نرم‌افزار کامسول طراحی شد و برای تعیین شرایط مرزی دمای فیلم مایلار و دمای آب گرم به‌صورت برابر فرض شد. شبیه‌سازی در سه دمای ۵۵، ۷۵ و ۹۵ درجه‌سلسیوس انجام شد. مطابق نتایج مدت زمان خشک شدن پوره‌ی کدوتنبل در فیلم مایلار با دمای ۵۵، ۷۵ و ۹۵ درجه‌سلسیوس به‌ترتیب ۵۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰ ثانیه بود (Ortiz-Jerez, Gulati, Datta, & Ochoa-Martínez, 2015).

به‌طور کلی، تحقیقات کمی در حوزه مدل‌سازی خشک‌کن رفرکتنس ویندو انجام شده‌است. در این مطالعه، مدل سه‌بعدی برای هر چهار لایه‌ی خشک‌کن رفرکتنس ویندو در مقیاس آزمایشگاهی در نرم‌افزار کامسول ایجاد شد و نحوه انتقال حرارت و جرم در آن برای پوره‌ی آلوئه‌ورا مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

خشک‌کن رفرکتنس ویندو

به‌طور کلی خشک‌کن رفرکتنس ویندو از یک حمام حرارتی استاتیکی تشکیل می‌شود که با آب پر می‌شود. در این خشک‌کن سطح آب با ورق پلاستیکی شفاف مادون قرمز (فیلم پلی‌استر مایلار[4]) با ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر پوشیده شده است. محصول اغلب به‌صورت خمیری یا پوره روی سطح بالایی مایلار پخش می‌شود. در مسیر خشک‌کردن چند فن قرار می‌گیرد تا بخار آبی که در اثر خشک شدن محصول ایجاد می‌شود را از بین ببرد و بخار آب از محفظه خشک‌کن خارج شود و مجدد به محصول بازنگردد (Kudra & Mujumdar, 2009). در شکل ۱ خشک‌کن رفرکتنس ویندو و شماتیک آن نشان داده شده‌است.

در این خشک‌کن فیلم مایلار سبب می‌شود تا انتقال حرارت به روش تشعشع به داخل آب بازتاب شود وقتی محصول مرطوب روی فیلم مایلار قرار می‌گیرد رطوبت موجود در آن جاذب مادون قرمز است و مانند یک پنجره عمل می‌کند که از طریق آن انتقال حرارت تشعشعی اتفاق می‌افتد. حدودا نیمی از کل تشعشع حرارتی به محصول پخش‌شده بر روی فیلم مایلار می‌رسد. گرما مستقیما به مولکول‌های آب در محصول منتقل می‌شود، همان‌طوری که محصول رطوبت خود را از دست می‌دهد، پنجره‌ی خشک‌شدن بسته می‌شود و انرژی تشعشعی به سمت منبع آب گرم شکست پیدا می‌کند و مجدد به آب بازتاب می‌شود. در این حالت تنها روش انتقال حرارت به‌صورت رسانش می‌باشد و از آن‌جا که فیلم پلیمری ضریب رسانایی پایینی دارد، از وارد شدن حرارت اضافی و بروز صدمه حرارتی به محصول خشک‌شده، جلوگیری می‌شود (Shende, Shrivastav, & Datta, 2019). در پایان فرآیند خشک‌کردن، محصول خشک‌شده روی یک مخزن آب خنک حرکت می‌کند و محصول خنک می‌شود تا از چسبندگی محصول به فیلم مایلار جلوگیری شود و خراشیدن آن آسان شود (Shende & Datta, 2019).

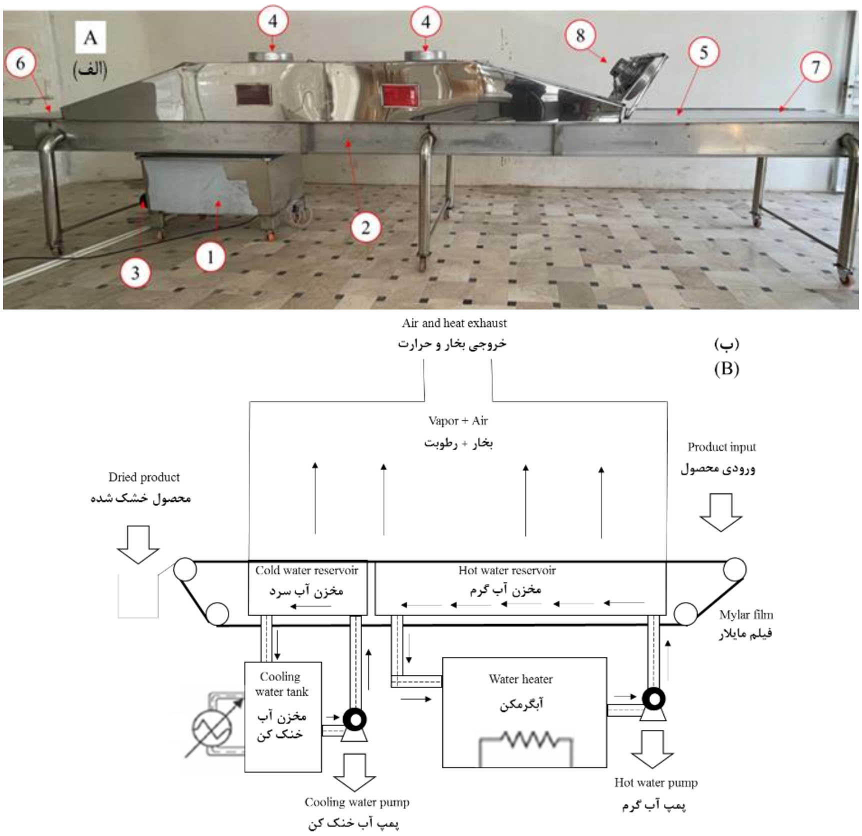
هندسه و فرضیات مسئله

در این مطالعه، به‌منظور شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در خشک‌کن رفرکتنس ویندو، ابتدا محفظه خشک‌کن که شامل چهار لایه است، در مقیاس آزمایشگاهی در فضای Geometry نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس نسخه ۵/۶ طراحی شده‌است، اندازه و ابعاد قسمت‌های مختلف این مدل هندسی در جدول ۱ ذکر شده‌است. همچنین مدل هندسی خشک‌کن رفرکتنس ویندو در این نرم‌افزار در

1- Feijoa
2- Logistic
3- Midilli

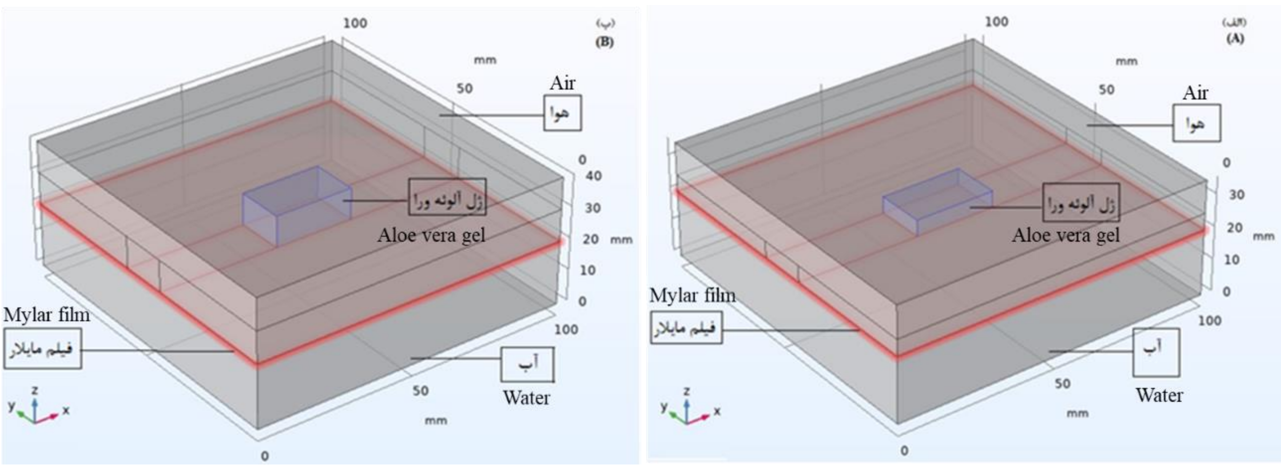
4- The polyester plastic film (Mylar)

شکل ۲ نشان داده شده‌است.



شکل ۱– الف) شکل واقعی خشک‌کن رفرکتنس ویندو (۱– حمام حرارتی، ۲– مخزن آب، ۳– پمپ آب، ۴– خروجی بخار و حرارت، ۵– فیلم مایلار، ۶– ورودی محصول، ۷– محصول خشک‌شده و ۸– فن) (واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی)، ب) شماتیک خشک‌کن رفرکتنس ویندو و قسمت‌های مختلف آن

Fig.1. A) The Refractance Window dryer (1- Controlled water bath, 2- Water flume, 3- Water pump, 4- Vapor extractors, 5- Mylar film, 6- Product entry point, 7-Dried product exit point, and 8- Fan) Located in the Khorasan Razavi Agriculture and Natural Resources Research Center, B) Schematic of Refractance Window dryer and its different parts



شکل ۲– مدل هندسی ترسیم‌شده در نرم‌افزار کامسول با دو ضخامت ژل آلوئه‌ورا: الف) ۵ میلی‌متر و ب) ۱۰میلی‌متر

Fig.2. Geometrical model drawn in Comsol software with two thicknesses of aloe vera gel: A) 5 mm and B) 10 mm

جدول ۱– اندازه و ابعاد قسمت‌های مختلف خشک‌کن رفرکتنس ویندو

Table 1- The dimensions of the different parts of the Refractance window dryer

ابعاد هندسی محفظه خشک‌کن طراحی‌شده در قسمت work plane نرم‌افزار کامسول The geometrical dimensions of the dryer chamber designed in the work plane section of Comsol software	میلی‌متر mm	منابع References
طول مخزن آب گرم Length of hot water tank	100	-
عرض مخزن آب گرم Width of hot water tank	100	-
ضخامت مخزن آب گرم Thickness of hot water tank	20	-
طول فیلم مایلار Length of Mylar film	100	-
عرض فیلم مایلار Width of Mylar film	100	-
ضخامت فیلم مایلار Thickness of Mylar film	0.25	(Ayala-Aponte *et al.*, 2021)
طول ژل آلوئه‌ورا Length of Aloe vera gel	25	(Ayala-Aponte *et al.*, 2021)
عرض ژل آلوئه‌ورا Width of Aloe vera gel	15	(Ayala-Aponte *et al.*, 2021)
ضخامت ژل آلوئه‌ورا Thickness of Aloe vera gel	5-10	(Ayala-Aponte *et al.*, 2021)

در این شبیه‌سازی بعد از رسم مدل هندسی، مواد لایه‌های مختلف خشک‌کن رفرکتنس ویندو برای نرم‌افزار از قسمت Materials تعریف شد. در این نرم‌افزار پارامترهای مورد نیاز برای حل مسئله در دو لایه‌ی آب و هوا به‌صورت پیش‌فرض در قسمت کتابخانه مواد به‌صورت روابطی بر حسب دما تعریف شده‌است. هم‌چنین با توجه به مقدار دمای آب در این مطالعه، دمای هوای خشک‌کن حدود ۵۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس است (Ayala-Aponte *et al.*, 2021). اما خصوصیات ترموفیزیکی شامل چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی فیلم مایلار، ژل آلوئه‌ورا در دو فاز مایع و جامد و تخلخل ژل آلوئه‌ورا در قسمت کتابخانه مواد تعریف نشده‌است و مقادیر آن مطابق جدول ۲ وارد نرم‌افزار شد. هم‌چنین در این شبیه‌سازی، فشار محفظه خشک‌کن ثابت نگه‌داشته‌شده‌است و تغییر فشار در محفظه در نظر گرفته‌نشده‌است و در طول فرآیند خشک کردن ابعاد ژل آلوئه‌ورا ثابت فرض شده‌است. هوا در سطح بالای محصول در یک جهت با سرعت ۰/۷ متر بر ثانیه در حال حرکت است.

پدیده‌های انتقال در محفظه‌ی خشک‌کن رفرکتنس ویندو

در فرآیند خشک‌کردن محصول در محفظه‌ی خشک‌کن رفرکتنس ویندو پدیده‌های انتقال مختلفی رخ می‌دهد (Nindo, & Tang, 2007; Ortiz-Jerez *et al.*, 2015). که در این پژوهش موارد زیر در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده‌است و در شکل ۳ شماتیک پدیده‌های انتقال نشان داده شده است:

- انتقال حرارت رسانشی بین تمام لایه‌های محفظه‌ی خشک‌کن و محصول
- انتقال حرارت تشعشعی بین تمام لایه‌های محفظه‌ی خشک‌کن و محصول
- انتقال حرارت همرفتی بین سطح مشترک محصول و هوا
- انتقال جرم از درون محصول به سطوح خارجی محصول (نفوذ)
- تبخیر رطوبت در سطوح مشترک محصول و هوا (تبخیر سطحی)

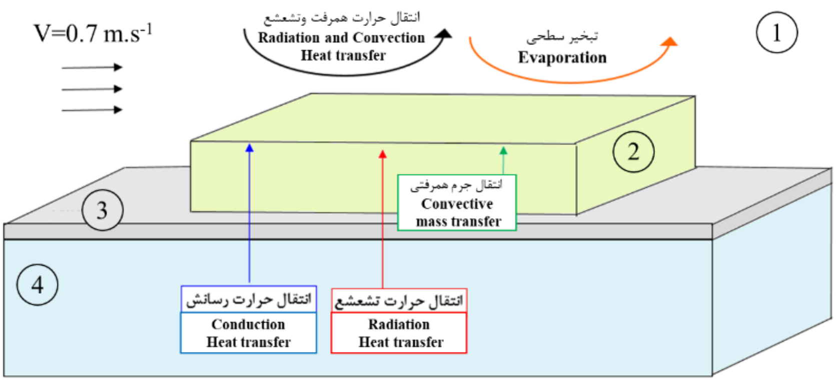
معادلات انتقال حرارت در خشک‌کن رفرکتنس ویندو

همان‌طور که بیان شد انتقال حرارت به سه روش رسانش، همرفت و تشعشع در خشک‌کن رفرکتنس ویندو رخ می‌دهد. به‌طور کلی فرآیند خشک کردن محصول در این خشک‌کن توسط انتقال حرارت از آب داغ به محصول انجام می‌پذیرد (Ortiz-Jerez, 2015)، شرایط مرزی انتقال حرارت در خشک‌کن رفرکتنس ویندو به شرح زیر است:

جدول ۲– مقادیر اولیه و خصوصیات ترموفیزیکی (Ayala-Aponte *et al*., 2021)

Table 2- Initial values and Thermophysical properties

پارامتر **Parameter**		مقدار **Value**	واحد **Unit**
چگالی فیلم مایلار Density of Mylar film		1430	$kg.m^{-3}$
ظرفیت گرمایی ویژه فیلم مایلار Special heat capacity of Mylar film		1600	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
ضریب هدایت حرارتی فیلم مایلار Thermal conductivity coefficient of Mylar film		0.19	$W.m^{-1}.K^{-1}$
تخلخل ژل آلوئه‌ورا (φ) Porosity of Aloe vera gel		0.99	-
دمای اولیه ژل آلوئه‌ورا Initial temperature of Aloe vera gel		4	$^{\circ}C$
رطوبت اولیه ژل آلوئه‌ورا Initial moisture of Aloe vera gel		110	$g_{water}.g^{-1}_{solid}$
رطوبت نهایی ژل آلوئه‌ورا Final moisture of Aloe vera gel		0.1	$g_{water}.g^{-1}_{solid}$
چگالی ژل آلوئه‌ورا Density of Aloe vera gel	فاز مایع (آب) Liquid phase (water)	$\rho_{Water} = 1001.4 - 0.1276\,T - 0.0029\,T^2$	$kg.m^{-3}$
	فاز جامد (ماده خشک) Solid phase (dry matter)	$\rho_{solid} = 720$	
ظرفیت گرمایی ویژه ژل آلوئه‌ورا Special heat capacity of Aloe vera gel	فاز مایع (آب) Liquid phase (water)	$C_{p,Water} = 4176.2 - 0.0909\,T + 5.4731\times 10^{-3}\,T^2$	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
	فاز جامد (ماده خشک) Solid phase (dry matter)	$C_{p,solid} = 2946$	
ضریب هدایت حرارتی ژل آلوئه‌ورا Thermal conductivity coefficient of Aloe vera gel	فاز مایع (آب) Liquid phase (water)	$K_{Water} = 0.57109 + 1.762\times 10^{-3}\,T - 6.7036\times 10^{-6}\,T^2$	$W.m^{-1}.K^{-1}$
	فاز جامد (ماده خشک) Solid phase (dry matter)	$K_{solid} = 0.34$	



شکل ۳– شماتیک پدیده‌های انتقال در محفظه‌ی خشک‌کن رفرکتنس ویندو (۱– هوا، ۲– ژل آلوئه‌ورا، ۳– فیلم مایلار و ۴– آب)

Fig.3. Schematic diagram of transfer phenomena in Refractance window dryer
(1- Air, 2- Aloe vera gel, 3- Mylar film, and 4-Water)

تبادل حرارت به روش رسانش در تمام لایه‌های محفظه‌ی خشک‌کن

معادله حاکم برای انتقال حرارت رسانشی بین لایه‌ها طبق قانون فوریه مطابق رابطه‌ی (۱)تعریف می‌شود (Kumar *et al*., 2022):

$$q = -K\nabla T = K\left(\frac{\partial T}{\partial x}i + \frac{\partial T}{\partial y}j + \frac{\partial T}{\partial z}k\right) \quad (۱)$$

که در رابطه (۱)، ∇T گرادیان دما ($^{\circ}K$)، q شار حرارتی ($W.m^{-2}$) و K ضریب هدایت حرارتی ($W.m.^{\circ}K^{-1}$) هستند. در این پژوهش،

به‌منظور شبیه‌سازی انتقال حرارت رسانشی در محفظه‌ی خشک‌کن از ماژول "Heat Transfer in Solids and Fluids" استفاده شده‌است، این ماژول شامل دو قسمت جامد[1] و سیال[2] است. در این ماژول برای دامنه‌ی[3] قسمت جامد لایه‌ی فیلم مایلار و برای دامنه‌ی قسمت سیال لایه‌های آب و هوا انتخاب شده‌است، و لایه‌ی محصول(آلوئه‌ورا) به‌عنوان یک قسمت محیط متخلخل تعریف شد، که در شکل ۴ قسمت‌های آبی رنگ، مرزهایی است که انتقال حرارت رسانشی در آن تعریف شده‌است. با تعریف این ماژول انتقال حرارت رسانشی بین تمام لایه‌های انتخاب شده برقرارخواهد شد.



شکل ٤– شرایط مرزی انتقال حرارت رسانشی

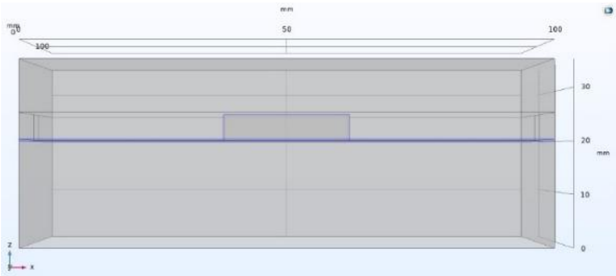
Fig.4. Boundary conditions for conductive heat transfer

تبادل حرارت به روش تشعشع در مرزهای مشترک بین آب، فیلم مایلار، محصول و هوا

به‌طور کلی از همه‌ی مواد (جامد، مایع و گاز) در دمای بالاتر از صفر مطلق از طریق امواج الکترومغناطیسی انرژی ساطع می‌شود. در خشک‌کن رفرکتنس ویندو آب با دمای نزدیک به نقطه جوش را می‌توان جسم سیاه در نظر گرفت و میزان انرژی تشعشعی ساطع‌شده از یک جسم سیاه، طبق قانون استفان–بولتزمن[4] مطابق رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود (Kumar *et al.*, 2022):

$$-q = \varepsilon\sigma(T_{amb}^{4} - T^{4}) \qquad (۲)$$

که در رابطه‌ی (۲)، q شار حرارتی ($W.m^{-2}$)، ε ضریب صدور سطح جسم (ε=1)، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67\times10^{-8}\ Wm^{-2}K^{-4}$)، T_{amb} و T به‌ترتیب، دمای هوای اطراف (298°K) و دما (°K) است. در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی انتقال حرارت تشعشعی از قسمت "Heat Sources"، ماژول "Surface-to-Ambient Radiation" انتخاب شد و مرزهایی که انتقال حرارت تشعشعی در آن‌ها رخ می‌دهد، در این بخش انتخاب شد، که در شکل ۵ قسمت‌های آبی رنگ، مرزهایی است که انتقال حرارت تشعشعی در آن تعریف شده‌است.



شکل ۵– شرایط مرزی انتقال حرارت تشعشعی

Fig.5. Boundary conditions for radiation heat transfer

تبادل حرارت به روش همرفت در مرزهای مشترک محصول و هوا

میزان انتقال حرارت همرفتی بین دو سطح جامد و سیال به میزان اختلاف دمای دو سطح و مساحت سطح تماس آن بستگی دارد. معادله حاکم برای انتقال حرارت همرفتی طبق قانون سرمایش نیوتن مطابق رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود (Durigon, Parisotto, Carciofi, & Laurindo, 2017):

$$-q = h_t(T_{amb} - T) \qquad (۳)$$

که در رابطه‌ی (۳)، q شار حرارتی ($W.m^{-2}$)، h_t ضریب انتقال حرارت همرفتی ($W.m^{-2}.K^{-1}$)، T_{amb} و T دمای هوای اطراف و دما (°K) است. ضریب انتقال حرارت همرفتی برای جریان آرام و آشفته در این خشک‌کن به‌ترتیب از رابطه‌ی (۴) و (۵) محاسبه می‌شود (Ayala-Aponte *et al.*, 2021):

$$h_t = 2\frac{K_{air}}{L}\frac{0.3387\,Pr^{1/3}\,Re^{1/2}}{\left(1+\left(\frac{0.0468}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{1/4}} \qquad \text{If } Re\leq5\times10^{5} \qquad (۴)$$

$$h_t = 2\frac{K_{air}}{L}Pr^{1/3}(0.037\,Re^{4/5} - 871) \qquad \text{If } Re>5\times10^{5} \qquad (۵)$$

که در رابطه‌ی (۴) و (۵)، K_{air} ضریب هدایت حرارتی هوا ($W.m^{-1}.K^{-1}$)، Re عدد رینولدز[5]، Pr عدد پرانتل[6] و L ضخامت محصول (m) است.

مقادیر عدد رینولدز و پرانتل از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود (Ayala-Aponte *et al.*, 2021).

$$Pr = \frac{C_{p,air}\mu_{air}}{K_{air}} \qquad (۶)$$

$$Re = \frac{\rho_{air}VL}{\mu_{air}} \qquad (۷)$$

1- Solid
2- Fluid
3- Domain
4- Stefan-Boltzman
5- Reynolds number (Re)
6- Prandtl number (Pr)

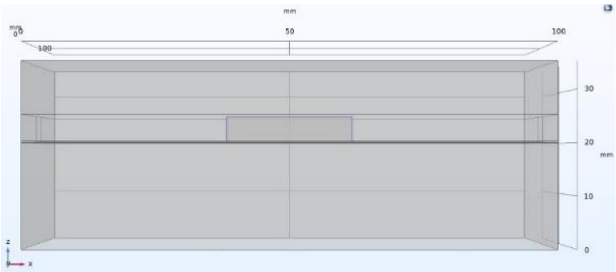
که در روابط (۶) و (۷)، μ_{air} ویسکوزیته دینامیکی هوا (Pa.s)، ρ_{air} چگالی هوا ($kg.m^{-3}$)، k_{air} ضریب هدایت حرارتی هوا ($W.m^{-1}.K^{-1}$)، $C_{p,air}$ ظرفیت گرمایی ویژه هوا ($j.kg^{-1}.K^{-1}$) و V سرعت سیال ($0.7\ m.s^{-1}$) است (Ayala-Aponte *et al.*, 2021). با توجه به مقادیر عدد رینولدز طبق جدول ۳، ضریب انتقال حرارت همرفتی در محدوده جریان آرام است.

جدول ۳– ضریب انتقال حرارت همرفتی در دماهای مختلف و پارامترهای تعیین‌کننده آن

Table 3- Convective heat transfer coefficient at different temperatures and its determining parameters

دمای آب Water temperature (˚C)		60	70	80	90
ρ_{air} ($kg.m^{-3}$)		1.092	1.082	1.072	1.062
$C_{p,air}$($j.kg^{-1}.K^{-1}$)		1006.04	1006.57	1007.10	1007.62
K_{air}($W.m^{-1}.K^{-1}$)		0.027	0.028	0.028	0.028
$\mu_{air}\times10^{-5}$(Pa. s)		1.96	1.97	1.99	2
Re		972.04	957.45	943.20	929.28
Pr		0.71	0.71	0.70	0.70
h_t($W.m^{-2}.K^{-1}$)	5mm	101.06	101	100.93	100.87
	10mm	50.53	50.50	50.46	50.43

در این مطالعه، برای شبیه‌سازی انتقال حرارت همرفتی، از ماژول "Heat Flux" استفاده شده و مرزی که انتقال حرارت همرفتی در آن رخ می‌دهد، در این بخش انتخاب می‌شوند، در شکل ۶ قسمت‌های آبی رنگ، مرزهایی است که انتقال حرارت همرفتی در آن تعریف شده‌است.



شکل ٦– شرایط مرزی انتقال حرارت همرفتی

Fig.6. Boundary conditions for convective heat transfer

قانون کلی برای تمام فرآیندهای انتقال حرارت بر اساس قانون اول ترمودینامیک ارائه می‌شود، که معادله‌ی آن در نرم‌افزار کامسول به‌صورت رابطه‌ی (۸) تعریف می‌شود (Kumar *et al.*, 2022):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u.\nabla T + \nabla.q = Q \quad (۸)$$

که در رابطه‌ی (۸)، ∂T تغییرات دما (˚K)، ∂t تغییرات زمان (s)، C_p ظرفیت گرمایی ویژه ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)، ρ چگالی ($kg.m^{-3}$)، Q منبع حرارتی داخلی ($0\ W.m^{-1}$)، q شار حرارتی ($W.m^{-2}$) و u سرعت جریان ($5\times10^{-7}\ m.s^{-1}$) هستند.

معادلات انتقال جرم در خشک‌کن رفرکتنس ویندو

انتقال جرم در پدیده خشک‌کردن رفرکتنس ویندو به دو صورت انتقال جرم رسانشی (نفوذ) و انتقال جرم همرفتی صورت می‌گیرد.

۱. انتقال جرم نفوذ که در محصول رخ می‌دهد: به این منظور از معادله فیک برای بررسی انتقال جرم در محصول استفاده شد. بر اساس قانون دوم انتشار فیک، میزان شار جرمی در محصول متناسب با گرادیان غلظت است و طبق رابطه‌ی (۹) تعریف می‌شود:

$$J = -D_{eff} \nabla C \quad (۹)$$

که در رابطه‌ی (۹)، ∇C گرادیان غلظت رطوبت محصول ($mol.m^{-3}$)، D_{eff} ضریب موثر نفوذ رطوبت ($m^2.s^{-1}$)، J شار جرمی ($mol.m^{-2}.s^{-1}$) هستند. مقدار ضریب موثر نفوذ رطوبت معمولا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود (Ayala-Aponte *et al.*, 2021):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{D^2}\right] \quad (۱۰)$$

که در رابطه‌ی (۱۰)، MR نسبت رطوبت، D_{eff}ضریب موثر نفوذ رطوبت ($m^2.s^{-1}$)، t زمان(s) و D ضخامت محصول (m) است و مقدار ضریب مؤثر نفوذ رطوبت از شیب نمودار لگاریتم نسبت رطوبت[1] بر زمان تعیین می‌شود. علاوه بر این، دمای هوای خشک‌کن یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در مقدار ضریب مؤثر نفوذ رطوبت است، معادله آرنیوس (رابطه (۱۱) ارتباط بین این دو پارامتر را بیان می‌کند (Compaoré *et al.*, 2019):

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{-Ea}{RT}} \quad (۱۱)$$

که در رابطه‌ی (۱۱)، D_0 ثابت انتشار ($2.6989\times10^{-6}\ m^2.s^{-1}$)،

1- ln(MR)

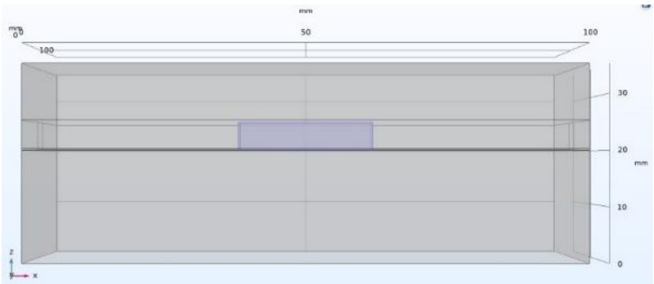
Ea انرژی فعال‌سازی ($j.mol^{-1}$)، T دمای هوای خشک‌کن ($^{\circ}K$) و R ثابت جهانی گازها ($8.314472\ j.K^{-1}mol^{-1}$) است. مقدار ضریب موثر نفوذ رطوبت در این مطالعه و طبق روابط (۱۰) و (۱۱) مطابق جدول ۴ است (Ayala-Aponte *et al*., 2021).

جدول ٤- مقدار ضریب موثر نفوذ رطوبت

Table 4- The value of the Diffusivity coefficient

ضخامت نمونه Sample thickness (mm)	**$D_{eff} \times 10^{-10} (m^2.s^{-1})$**			
	60°C	**70°C**	**80°C**	**90°C**
5	0.7	0.9	1.3	1.9
10	1.3	1.7	2.4	2.7

برای شبیه‌سازی انتقال جرم نفوذ از ماژول "Transport of Diluted Species" استفاده شد. برای تعیین شرایط مرزی در این بخش برای دامنه، لایه‌ی محصول را انتخاب کرده زیرا انتقال جرم در محصول رخ می‌دهد، که در شکل ۷ قسمت آبی رنگ، لایه‌ای است که انتقال جرم رسانشی در آن تعریف شده‌است.



شکل ۷- شرایط مرزی انتقال جرم رسانشی

Fig.7. Boundary conditions for conductive mass transfer

۲. انتقال جرم همرفتی: انتقال جرمی که بین سطح ژل آلوئه‌ورا و سیال متحرک (هوا) رخ می‌دهد و حرکت هوا نقش زیادی در خشک کردن محصول و انتقال جرم دارد و رطوبت به‌صورت بخار از سطح محصول خارج می‌شود (تبخیر سطحی) و مقدار آن از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود (Kumar *et al*., 2022):

$$-J = h_m (C_b - C) \tag{۱۲}$$

که در رابطه‌ی (۱۲)، J شار جرم، h_m ضریب انتقال جرم ($m^2.s^{-1}$)، C_b غلظت رطوبت اطراف ($1222.2\ mol.m^{-3}$) است. ضریب انتقال جرم همرفتی برای جریان آرام و آشفته در این خشک‌کن نیز طبق رابطه‌ی (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شود. با توجه به مقدار عدد رینولدز در این مطالعه، جریان آرام است و مقادیر ضریب انتقال جرم همرفتی مطابق جدول ۵ است (Ayala-Aponte *et al*., 2021).

$$h_m = \frac{0.332\ Re^{1/2}\ Sc^{1/3} D_{eff}}{L} \quad \text{If Re} \le 15000 \tag{۱۳}$$

$$h_m = \frac{0.0296\ Re^{4/5}\ Sc^{1/3} D_{eff}}{L} \quad \text{If Re} > 15000 \tag{۱۴}$$

که در روابط (۱۳) و (۱۴)، D_{eff} ضریب موثر نفوذ رطوبت ($m^2.s^{-1}$)، Re عدد رینولدز و Sc عدد اشمیت است، که عدد اشمیت مطابق رابطه‌ی (۱۵) محاسبه می‌شود (Ayala-Aponte *et al*., 2021).

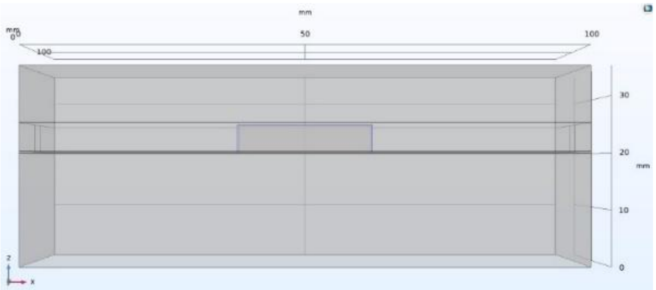
$$Sc = \frac{\mu_{air}}{\rho_{air} D_{eff}} \tag{۱۵}$$

برای شبیه‌سازی انتقال جرم همرفتی در خشک‌کن رفرکتنس ویندو از ماژول "Flux" استفاده شد. سطح مشترک محصول و هوا به‌عنوان شرایط مرزی تعیین شد. قسمت‌های آبی رنگ در شکل ۸، مرزهایی است که انتقال جرم همرفتی در آن تعریف شده‌است.

جدول ۵– ضریب انتقال جرم همرفتی در دماهای مختلف و پارامترهای تعیین‌کننده آن

Table 5- Convective mass transfer coefficient at different temperatures and its determining parameters

دمای آب Water temperature (°C)	ضخامت نمونه Sample thickness (mm)	Sc	$h_m \times 10^{-4} (m^2.s^{-1})$
60	5	2571.93	1.9
	10	1384.88	1.4
70	5	2030.87	2.3
	10	1075.16	1.7
80	5	1427.23	2.9
	10	773.08	2.2
90	5	991.16	3.8
	10	697.48	2.4



شکل ۸– شرایط مرزی انتقال جرم همرفتی

Fig.8. Boundary conditions of convective mass transfer

معادله کلی انتقال جرم در نرم‌افزار کامسول را می‌توان مطابق رابطه‌ی (۱۶) تعریف کرد (Kumar *et al.*, 2022):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla.J + h_m.\nabla C = R \qquad (۱۶)$$

که در رابطه‌ی (۱۶)، ∂C تغییرات غلظت محصول ($mol.m^{-3}$)، ∂t تغییرات زمان (s)، R مصرف یا تولید رطوبت و h_m ضریب انتقال جرم همرفتی ($m.s^{-1}$) هستند.

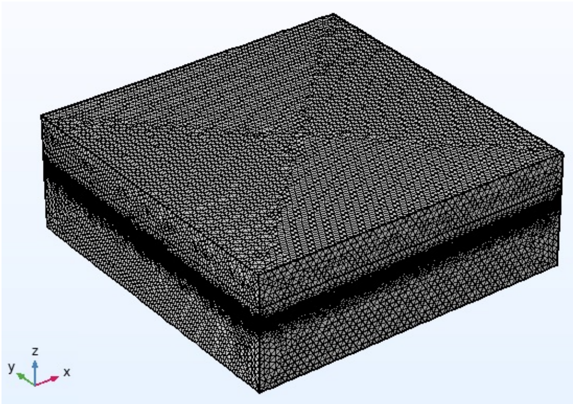
مش‌بندی (شبکه‌بندی)

در این مرحله مدل هندسی ایجادشده به قسمت یا المان‌های کوچک‌تر تقسیم‌بندی می‌شود. بدین منظور از المان‌های مثلثی و مربعی شکل با دو اندازه عنصر "Normal" و "Extremely fine" استفاده شد، در هر حالت برای اطمینان از درستی مش ایجادشده، کیفیت المان‌های مش از قسمت "Adaptive Mesh Refinement" ارزیابی شده‌است و در نهایت المان‌های مثلثی شکل با اندازه عنصر "Extremely fine" به‌عنوان بهترین حالت برای مش‌بندی انتخاب شد. با توجه به این‌که در ابتدای حل مسئله، مقدار گرمای قابل‌توجهی توسط آب گرم در داخل میوه ایجاد می‌شود و تبخیر رخ می‌دهد، تغییرات پارامترها بسیار زیاد است و مش‌بندی با کمتر از ۸۰۰۰۰۰ سلول موجب واگراشدن حل می‌شود. جهت همگرایی مسئله مش‌بندی به اندازه کافی کوچک شد. در آخر تعداد المان و رئوس مش مطابق جدول ۶ است و مش‌بندی نمونه مدل‌سازی‌شده در شکل ۹ نشان داده‌شده است.

جدول ٦– تعداد المان و رئوس مش در شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم خشک‌کن رفرکتنس ویندو

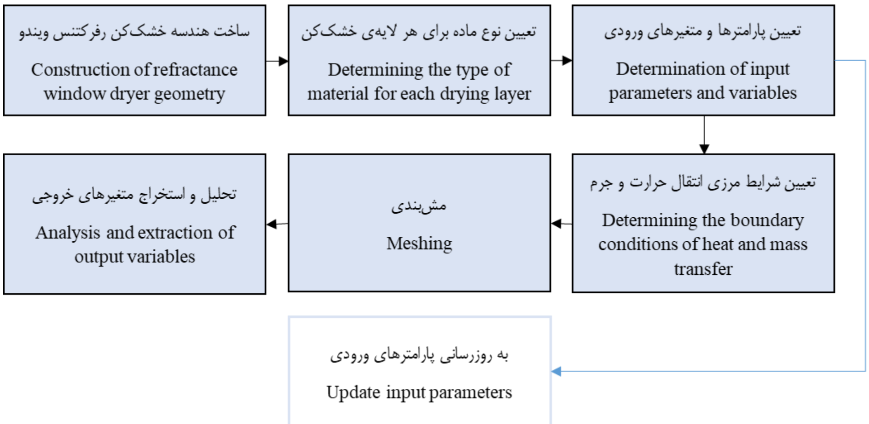
Table 6- The number of mesh elements and vertices in the simulation of heat and mass transfer of Refractance window

ضخامت نمونه Thickness of sample (mm)	المان Elements	رئوس مش Mesh vertices
5	814090	1740295
10	816212	1759206



شکل ۹- مش‌بندی نمونه مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار کامسول
Fig.9. Modeled sample meshing in Comsol software

سپس بعد از مرحله‌ی مش‌بندی، با توجه به شرایط مرزی تعیین‌شده که پیش‌تر بیان شد، معادلات برای یک گام زمانی حل می‌شوند، برای این کار از پنجره‌ی "Select Study" نوع آنالیز با توجه به فیزیک مسئله، "Time Dependent" انتخاب شده‌است. در این مطالعه، شبیه‌سازی انتقال حرارت و انتقال جرم خشک‌کن رفرکتنس ویندو یک مسئله‌ی وابسته به زمان است. به این ترتیب، دما و محتوی رطوبت آن در یک بازه زمانی ۳۰۰ دقیقه در هر ۵ دقیقه توسط نرم‌افزار کامسول اندازه‌گیری و ثبت شد. در هر گام نتایج گام قبل به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته می‌شوند و مجدد مسئله حل می‌شود. این کار به همین صورت ادامه می‌یابد تا با گذشت زمان مسئله به جواب قابل‌قبول برسد. در آخر متغیرهای خروجی در گام‌های زمانی مشخص از قسمت نتایج استخراج شده‌است. روش شبیه‌سازی و راهکار استفاده‌شده در این پژوهش در شکل ۱۰ نشان داده‌شده‌است.



شکل ۱۰- الگوریتم شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم خشک‌کن رفرکتنس ویندو در نرم‌افزار کامسول
Fig.10. Algorithm for simulation of heat and mass transfer of Refractance window dryer in Comsol software

نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به سینتیک خشک شدن، عوامل مؤثر بر آن، شبیه‌سازی المان محدود خشک شدن آلوئه‌ورا و ارزیابی مدل از طریق مقایسه با نتایج مقالات دیگر ارائه خواهد شد.

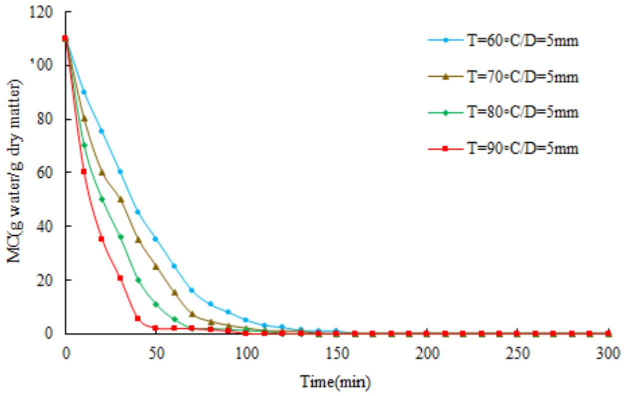
اثر دمای آب گرم و ضخامت محصول بر فرآیند خشک کردن آلوئه‌ورا

نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند خشک‌شدن نشان داد که، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت ۰/۱ گرم آب بر گرم ماده خشک آلوئه‌ورا در دمای آب ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب برای ضخامت ۵ میلی‌متر ۱۲۰، ۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ دقیقه و برای ضخامت ۱۰ میلی‌متر ۲۴۰، ۱۹۰، ۱۵۰و ۱۲۰ دقیقه بود. همان‌طور که در شکل ۱۱

و ۱۲ به‌ترتیب برای ضخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر ملاحظه می‌شود، هنگام شروع فرآیند سرعت خشک‌شدن محصول بیش‌تر است، هرچه از فرآیند خشک‌شدن محصول می‌گذرد، سرعت خشک‌شدن کاهش می‌یابد.

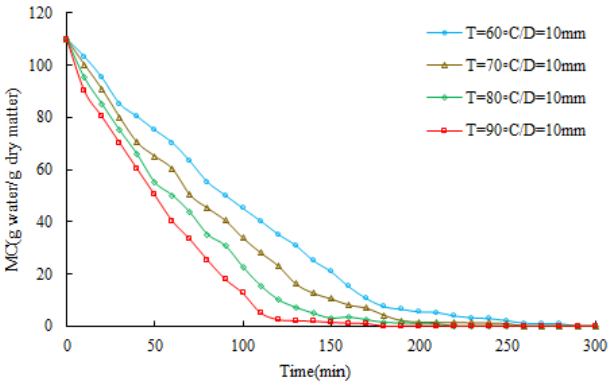
از دست دادن سریع آب توسط خشک‌کن رفرکتنس‌ویندو نتیجه انتقال جرم و انرژی بالایی بود که همزمان در صفحات آلوئه‌ورا رخ داد، زیرا در طول خشک‌کردن رفرکتنس‌ویندو، هر سه حالت انتقال حرارت فعال هستند. اگرچه در خشک‌کن‌های دیگر انتقال حرارت رسانشی غالب است، در این خشک‌کن رسانش، همرفت و تشعشع در فصل مشترک آب گرم و فیلم مایلار، رسانش و تشعشع از طریق فیلم مایلار و همرفت در فصل مشترک محصول و هوا رخ می‌دهد (Raghavi, Moses, & Anandharamakrishnan, 2018).

کاهش زمان خشک‌شدن محصول به دلیل تأثیر دمای آب ممکن است با اختلاف دمای بالاتر بین منبع گرما (آب) و صفحات ژل آلوئه‌ورا توضیح داده‌شود، که به حذف سریع آب از محصول کمک می‌کند. با توجه به آثار دیگر پژوهشگران، افزایش دما باعث افزایش انتقال حرارت، سرعت تبخیر و انتقال آب از داخل محصول به سطح آن می‌شود و در نهایت محصول سریع‌تر خشک می‌شود (Kaur, Saha, Kumari, & Datta, 2017; Beigi, 2019). هرچه ضخامت نمونه کم‌تر باشد، نمونه سریع‌تر گرم می‌شود. در نتیجه به مولکول‌های آب اجازه می‌دهد تا در مدت زمان کوتاه‌تری به سطح نمونه رفته و تبخیر شوند. بنابراین، افزایش ضخامت محصول باعث کاهش در جریان جرمی شده و در نتیجه نرخ خشک شدن کم‌تر می‌شود.



شکل ۱۱– نمودار خشک شدن ژل آلوئه‌ورا در دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس با ضخامت ۵ میلی‌متر

Fig.11. Aloe vera gel drying diagram in hot water temperatures of 60, 70, 80, and 90 degrees Celsius with a thickness of 5 mm



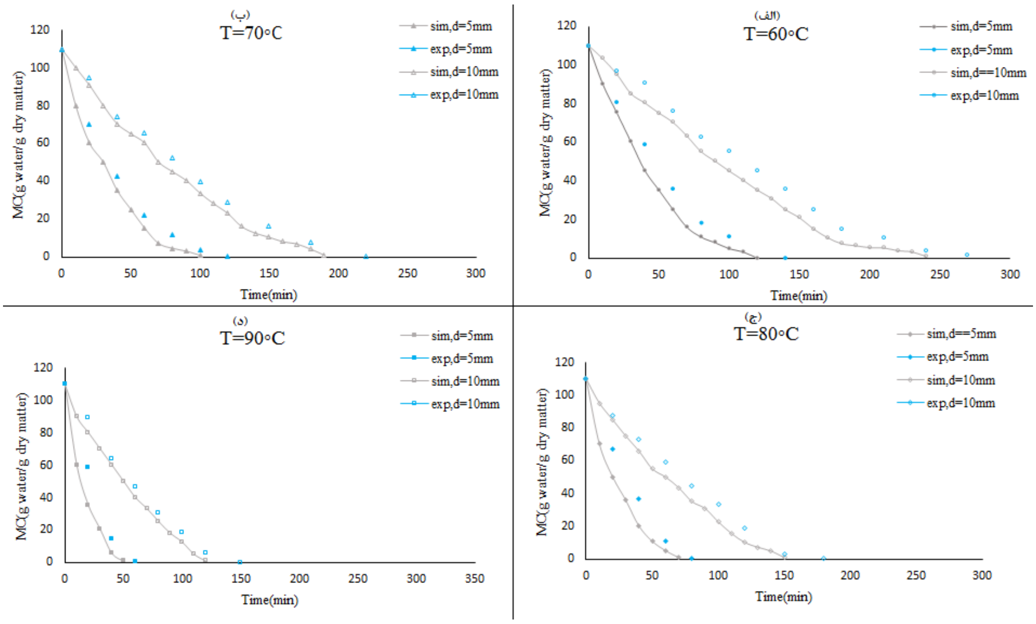
شکل ۱۲– نمودار خشک شدن ژل آلوئه‌ورا در دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر

Fig.12. Aloe vera gel drying diagram in hot water temperatures of 60, 70, 80, and 90 degrees Celsius with a thickness of 10 mm

اعتبارسنجی مدت زمان خشک شدن محصول

شبیه‌سازی انجام‌شده توسط نرم‌افزار کامسول به‌منظور قابل‌اعتماد بودن بایستی اعتبارسنجی شوند. برای این منظور از نتایج حاصل آزمایش‌های تجربی مقاله‌ی آیالا-آپونته و همکاران (Ayala-Aponte

استفاده گردید (*et al.*, 2021). در این تحقیق دریافتند برای رسیدن به رطوبت نهایی ۰/۱ گرم آب بر گرم جامد، در صفحات ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۵ میلی‌متر بـه مـدت زمـان ۱۴۵، ۱۲۰، ۸۱ و ۵۵ دقیقـه در دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه‌سلسیوس و برای صفحات ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به‌۲۷۰، ۲۲۰، ۱۶۰ و ۱۴۵ دقیقـه در دمـای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه‌سلسیوس نیاز است. طبق نتایج حاصل مدت زمان خشک شدن محصول از تطابق خوبی با نتایج حاصـل از شـبیه‌سـازی برخوردار بودند که این تطابق در شکل ۱۳ نشان داده‌شده‌است.



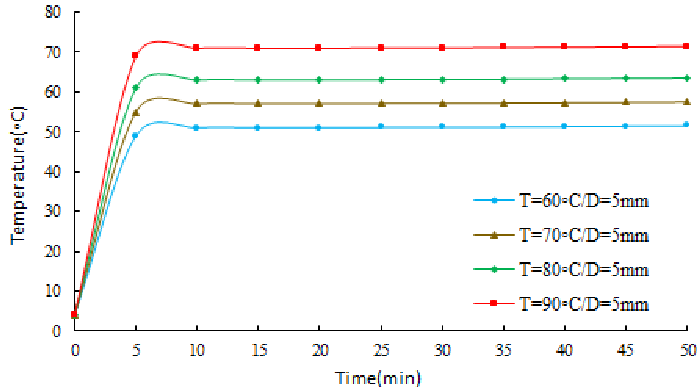
شکل ۱۳– اعتبارسنجی مدت زمان خشک شدن محصول برای ضخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر در آب گرم با دمای (الف)۶۰ درجه سلسیوس، (ب) ۷۰ درجه سلسیوس، (ج) ۸۰ درجه سلسیوس و (د) ۹۰ درجه سلسیوس

Fig.13. Validation of product drying time for thickness of 5 and 10 mm in hot water with temperature (A) 60 degrees Celsius, (B) 70 degrees Celsius, (C) 80 degrees Celsius, and (D) 90 degrees Celsius

اثر دمای آب داغ و ضـخامت محصـول بـر میـانگین دمـای محصول

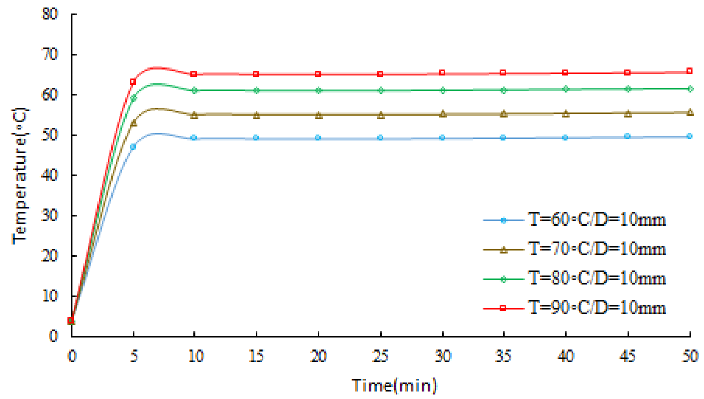
در این شبیه‌سازی، دمای اولیـه ژل آلوئـه‌ورا ۴ درجـه سلسـیوس (دمای یخچال) بود و با شروع فرآینـد خشـک‌شـدن دمـای محصـول افزایش یافت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که، دمـای محصـول در آب گرم با دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس برای ژل آلوئـه‌ورا بـا ضخامت ۵ میلی‌متر به‌ترتیب به ۵۱، ۵۷، ۶۳ و ۷۱ درجه سلسـیوس و برای ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بـه‌ترتیب بـه ۴۷، ۵۵، ۶۳ و ۶۵ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. طبق نتـایج هرچـه ضـخامت ژل آلوئه‌ورا کم‌تر باشد، دمای محصـول در طـول فرآینـد خشـک کـردن بیش‌تر است.

همان‌طور که در شکل ۱۴ و ۱۵ به‌ترتیب برای ضـخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر ملاحظه می‌شود، به‌طور کلـی در هـر چهـار دمـای آب گـرم بررسی‌شده در فرآیند خشک‌کردن، دمای محصـول در ابتـدا افـزایش سریعی دارد و پس از آن در طول فرآیند خشک‌کردن همان دما تقریباً ثابت می‌ماند و به دمای آب گرم نمی‌رسـد. زیـرا طبـق ویژگـی‌هـای خشک‌کن رفرکتنس ویندو هرچـه از زمـان خشـک کـردن محصـول می‌گذرد، رطوبت محصول کاهش می‌یابد، انتقال حـرارت نیـز کـم‌تـر می‌شود و دمای محصول در همان مقادیر ثابت می‌ماند.



شکل ١٤– نمودار دما ژل آلوئه‌ورا در دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس با ضخامت ۵ میلی‌متر

Fig.14. Temperature diagram of aloe vera gel in hot water temperatures of 60, 70, 80, and 90 degrees Celsius with a thickness of 5 mm



شکل ١٥– نمودار دما ژل آلوئه‌ورا در دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر

Fig.15. Temperature diagram of aloe vera gel in hot water temperatures of 60, 70, 80, and 90 degrees Celsius with a thickness of 10 mm

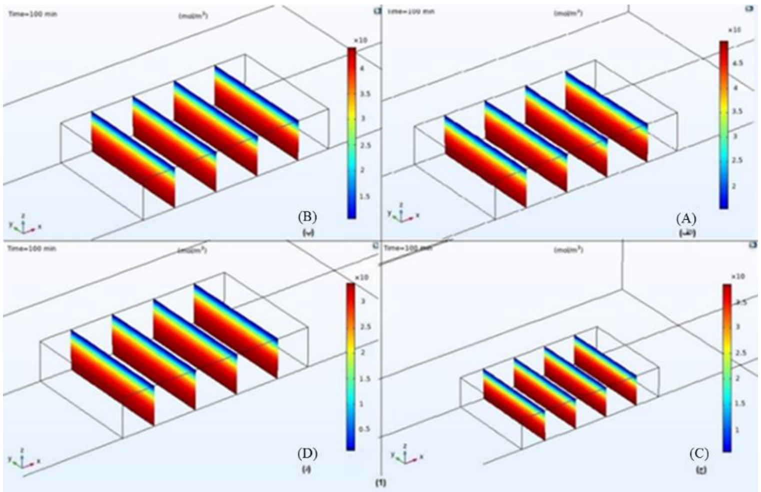
ارزیابی مدل در تعیین توزیع رطوبت

درک توزیع محتوای رطوبت بسیار مهم است زیرا ممکن است محصول ظاهرا در سطح خشک به نظر برسد، اما مقدار قابل‌توجهی رطوبت داشته باشد. اختلاف رطوبت در داخل محصول بر کیفیت نهایی محصول تأثیر می‌گذارد. بنابراین، بررسی توزیع رطوبت در محصول ضروری است (Khan, Kumar, Joardder, & Karim, 2017).

رطوبت را در کل محصول در هر مرحله زمانی می‌توان توسط نرم‌افزار کامسول محاسبه کرد. شکل ۱۶ و ۱۷ توزیع رطوبت سه‌بعدی به‌صورت مقاطع مختلف طولی در سراسر ژل آلوئه‌ورا را پس از ۱۰۰ دقیقه به‌ترتیب برای ضخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود، بعد از گذشت ۱۰۰ دقیقه از شروع فرآیند خشک شدن در قسمت (الف) دمای آب گرم ۶۰ درجه‌سلسیوس است و میزان رطوبت ژل آلوئه‌ورا به حدود ۴۵ مول بر مترمکعب رسید در قسمت (ب)، (ج) و (د) میزان رطوبت به‌ترتیب به حدود ۴۰، ۳۵ و ۳۰ مول بر مترمکعب رسیده و با توجه به این‌که طبق مقاله‌ی آیلا-آپونته و همکاران (Ayala-Aponte *et al.*, 2021)، میزان رطوبت نهایی در ژل آلوئه‌ورا ۰/۱ گرم آب بر گرم جامد و یا حدود ۴۰ مول بر مترمکعب است، در این سه قسمت، آلوئه‌ورا خشک شده است. در شکل ۱۷ ضخامت ژل آلوئه‌ورا ۱۰ میلی‌متر است و بعد از گذشت ۱۰۰ دقیقه از شروع فرآیند خشک شدن ملاحظه می‌شود که در قسمت (الف)، (ب)، (ج) و (د) میزان رطوبت به‌ترتیب برای دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه‌سلسیوس به حدود ۸۵، ۷۵، ۶۵ و ۵۵ مول بر مترمکعب رسید و ژل آلوئه‌ورا کاملا خشک نشده‌است.

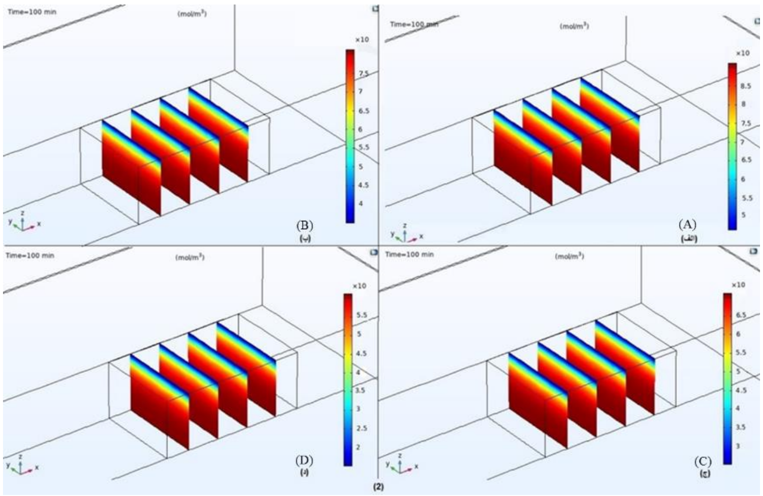
در شروع خشک‌کردن، میزان رطوبت در سراسر ژل آلوئه‌ورا یکنواخت بود، اما همان‌طور که در شکل ۱۶ و ۱۷ ملاحظه می‌شود در طول خشک‌کردن محصول (بعد از گذشت ۱۰۰ دقیقه) رطوبت ژل به سمت سطح خمیر کاهش می‌یابد. تفاوت در میزان رطوبت در

مکان‌های مختلف در یک زمان خاص به دلیل نرخ تبخیر بالاتر در سطح، با سرعت انتشار رطوبت قابل‌توجه به سمت سطح محصول است. با توجه به این‌که بخش عمده‌ی ژل آلوئه‌ورا از آب تشکیل شده‌است در طول خشک کردن توزیع رطوبت در هر دو ضخامت به‌صورت یکنواخت است.



شکل ۱۶– توزیع رطوبت ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۵ میلی‌متر در ۱۰۰ دقیقه هنگامی که دمای آب (الف)۹۰ درجه سلسیوس، (ب)۸۰ درجه سلسیوس، (ج)۷۰ درجه سلسیوس و (د)۶۰ درجه سلسیوس است.

Fig.16. Moisture distribution of aloe vera gel with a thickness of 5 mm at 100 minutes when the water temperature is (A) 90 ˚C, (B) 80 ˚C, (C) 70 ˚C, and (D) 60 ˚C



شکل ۱۷– توزیع رطوبت ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر در ۱۰۰ دقیقه هنگامی که دمای آب (الف)۹۰ درجه سلسیوس، (ب)۸۰ درجه سلسیوس، (ج)۷۰ درجه سلسیوس و (د)۶۰ درجه سلسیوس است.

Fig.17. Moisture distribution of aloe vera gel with a thickness of 10 mm at 100 minutes when the water temperature is (A) 90 ˚C, (B) 80 ˚C, (C) 70 ˚C, and (D) 60 ˚C

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس، مدلی سه‌بعدی برای درک و تجسم اثر متغیرهای ورودی مختلف مانند دمای آب گرم و ضخامت محصول بر روی توزیع دما و توزیع رطوبت در کل محصول شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی‌شده درک بهتری نسبت به توزیع دما و رطوبت در کل محصول نشان داد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- توزیع رطوبت نشان می‌دهد در حالی‌که رطوبت سطح محصول پایین و تقریبا خشک بود، مرکز و کف آن دارای رطوبت قابل‌توجهی بودند. نحوه توزیع رطوبت شبیه‌سازی‌شده مطابقت خوبی با داده‌های مقالات مشابه نشان داده‌اند.

۲- با توجه به بررسی توزیع رطوبت در نرم‌افزار کامسول سرعت خشک شدن برای صفحات ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۵ میلی‌متر در آب گرم با دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۰/۹۱۵، ۱/۰۹۹، ۱/۵۷ و ۲/۱۹۸ گرم آب بر دقیقه و برای صفحات ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر در آب گرم با دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۰/۴۵۷، ۰/۵۷۸، ۰/۷۳۲ و ۰/۹۱۵ گرم آب بر دقیقه می‌باشد. از نتایج حاصل می‌توان نتیجه گرفت هرچه دمای آب گرم بالاتر و ضخامت محصول کم‌تر باشد محصول سریع‌تر خشک می‌شود.

۳- توزیع رطوبت و توزیع دما درون محصول با حل معادلات انتقال جرم و حرارت در مدل المان محدود در طول فرآیند خشک شدن به‌دست می‌آید. این شبیه‌سازی به درک مکانیسم انتقال حرارت و انتقال جرم در طول خشک کردن مواد غذایی مختلف کمک می‌کند و امکان توسعه خشک‌کن‌های کارآمدتر را برای صنعت فرآوری مواد غذایی فراهم می‌کند.

References

1. Antury, K. L. A., Rojas, D. A. V., & Bermeo, O. M. B. (2021). Conservación de las propiedades nutraceúticas del Aloe Vera (Aloe Barbadensis Miller), mediante técnicas de secado. *Ingeniería y Región*, (25), 6-21. https://doi.org/10.25054/22161325.2818
2. Ayala-Aponte, A. A., Cárdenas-Nieto, J. D., & Tirado, D. F. (2021). Aloe vera Gel Drying by Refractance Window®: Drying Kinetics and High-Quality Retention. *Foods*, *10*(7), 1445. https://doi.org/10.3390/foods10071445
3. Añibarro-Ortega, M., Pinela, J., Barros, L., Ćirić, A., Silva, S. P., Coelho, E., ... & Ferreira, I. C. (2019). Compositional features and bioactive properties of Aloe vera leaf (fillet, mucilage, and rind) and flower. *Antioxidants*, *8*(10), 444. https://doi.org/10.3390/antiox8100444
4. Beigi, M. (2019). Drying of mint leaves: Influence of the process temperature on dehydration parameters, quality attributes, and energy consumption. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *21*(1), 77-88.
5. Compaoré, A., Putranto, A., Dissa, A. O., Ouoba, S., Rémond, R., Rogaume, Y., ... & Koulidiati, J. (2019). Convective drying of onion: modeling of drying kinetics parameters. *Journal of Food Science and Technology*, *56*(7), 3347-3354.
6. Dev, S. R., & Raghavan, V. G. (2012). Advancements in drying techniques for food, fiber, and fuel. *Drying Technology*, *30*(11-12), 1147-1159. https://doi.org/10.1080/07373937.2012.692747
7. Durigon, A., Parisotto, E. I. B., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2018). Heat transfer and drying kinetics of tomato pulp processed by cast-tape drying. *Drying Technology*, *36*(2), 160-168. https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1304411
8. Duarte-Correa, Y., Vargas-Carmona, M. I., Vásquez-Restrepo, A., Ruiz Rosas, I. D., & Perez Martinez, N. (2021). Native potato (Solanum phureja) powder by Refractance Window Drying: A promising way for potato processing. *Journal of Food Process Engineering*, *44*(10), e13819. https://doi.org/10.1111/jfpe.13819
9. Franco, S., Jaques, A., Pinto, M., Fardella, M., Valencia, P., & Núñez, H. (2019). Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 52, 8-16. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.12.001
10. Herrera Ardila, P. A. (2022) Mathematical modeling and simulation of refractance window drying of whole milk and yoghurt (Master's thesis, Universidad de La Sabana).
11. Jafari, S. M., Azizi, D., Mirzaei, H., & Dehnad, D. (2016). Comparing quality characteristics of oven dried and Refractance Window dried kiwifruits. *Journal of Food Processing and Preservation*, *40*(3), 362-372. https://doi.org/10.1111/jfpp.12613
12. Kaur, G., Saha, S., Kumari, K., & Datta, A. K. (2017). Mango pulp drying by refractance window method. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *19*(4).
13. Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). Advanced drying technologies. CRC press. https://doi.org/10.1201/9781420073898
14. Kumar, R., Singh, A. K., Gupta, A., Bishayee, A., & Pandey, A. K. (2019). Therapeutic potential of Aloe vera—A miracle gift of nature. *Phytomedicine*, *60*, 152996. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.152996
15. Kumar, M., Madhumita, M., Srivastava, B., & Prabhakar, P. K. (2022). Mathematical modeling and simulation of refractance window drying of mango pulp for moisture, temperature, and heat flux distribution. *Journal of Food Process Engineering*, *45*(9), e14090. https://doi.org/10.1111/jfpe.14090
16. Khan, M. I. H., Kumar, C., Joardder, M. U. H., & Karim, M. A. (2017). Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. *Drying Technology*, *35*(3), 335-346.

https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1170700

17. Mahapatra, A., & Tripathy, P. P. (2018). Modeling and simulation of moisture transfer during solar drying of carrot slices. *Journal of Food Process Engineering*, *41*(8), e12909.
18. Milczarek, R. R., & Alleyne, F. S. (2017). *Mathematical and computational modeling simulation of solar drying systems*. In Solar drying technology (pp. 357-379). Springer, Singapore.
19. Nindo, C. I., & Tang, J. (2007). Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. *Drying Technology*, *25*(1), 37-48. https://doi.org/10.1080/07373930601152673
20. Nindo, C. I., Feng, H., Shen, G. Q., Tang, J., & Kang, D. H. (2003). Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. *Journal of Food Processing and Preservation*, *27*(2), 117-136. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2003.tb00506.x
21. Ortiz-Jerez, M. J., Gulati, T., Datta, A. K., & Ochoa-Martínez, C. I. (2015). Quantitative understanding of Refractance Window™ drying. *Food and Bioproducts Processing*, *95*, 237-253. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.05.010
22. Raghavi, L. M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2018). Refractance window drying of foods: A review. *Journal of Food Engineering*, *222*, 267-275. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032
23. Rajoriya, D., Shewale, S. R., & Hebbar, H. U. (2019). Refractance window drying of apple slices: Mass transfer phenomena and quality parameters. *Food and Bioprocess Technology*, *12*(10), 1646-1658. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02334-7
24. Sánchez, A. M. C., Lancheros, E. Y. M., Carvajal, M. X. Q., & Moreno, F. L. M. (2020). Sorption isotherms and drying kinetics modelling of convective and refractance window drying of feijoa slices (Acca sellowiana Berg). *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, *7*(2), 118-136. https://doi.org/10.1504/IJPTI.2020.109634
25. Shende, D., Shrivastav, A., & Datta, A. K. (2019). Effect of mango puree thickness on refractance window drying for making mango leather. IMPACT: *International Journal of Research in Engineering & Technology*, *7*, 41-54.
26. Shende, D., & Datta, A. K. (2020). Optimization study for refractance window drying process of Langra variety mango. *Journal of Food Science and Technology*, *57*(2), 683-692. https://doi.org/10.1111/jfpp.12435
27. Shende, D., & Datta, A. K. (2019). Refractance window drying of fruits and vegetables: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *99*(4), 1449-1456.
28. Zou, Q., Opara, L. U., & McKibbin, R. (2006). A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial analysis and development of mathematical models. *Journal of Food Engineering*, *77*(4), 1037-1047. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.042